第 38 卷第 11 期 生 态 学 报 Vol.38,No.11
2018 年 6 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Jun.,2018

DOI: 10.5846/stxb201708271546
彭建,魏海,武文欢,刘焱序,王仰麟.基于土地利用变化情景的城市暴雨洪涝灾害风险评估——以深圳市茅洲河流域为例.生态学报,2018,38(11):3741-3755.
Peng J, Wei H, Wu W H, Liu Y X, Wang Y L.Storm flood disaster risk assessment in urban area based on the simulation of land use scenarios: A case of Maozhou Watershed in Shenzhen City.Acta Ecologica Sinica,2018,38(11):3741-3755.

基于土地利用变化情景的城市暴雨洪涝灾害风险评估
——以深圳市茅洲河流域为例

彭 建,魏 海,武文欢,刘焱序,王仰麟*
北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871

摘要:近年来频发的暴雨洪涝成为威胁城市可持续发展的主要灾害类型,而土地利用变化改变了区域原有的景观结构和水文过程,是城市暴雨洪涝灾害风险加剧的重要诱因,定量探讨土地利用变化对暴雨洪涝灾害及其风险影响具有重要意义。以深圳市茅洲河流域为例,基于 CLUE-S 模型、SCS 模型及等体积淹没算法等,对 12 种暴雨洪涝致灾-土地利用承灾情景下的城市暴雨洪涝灾害风险进行定量模拟。研究结果显示,相同土地利用空间格局下城市暴雨洪涝灾害随暴雨致灾危险性增加风险加剧显著;在同等致灾危险性水平下随建设用地面积增加,中等风险和高风险区面积均呈现较为明显的增加趋势,中、高风险区面积与建设用地面积的增加率表现出较高的协同变化特征;以 50 年遇危险性水平为例,随着建设用地面积由基期的 15368.85hm^{2}增加至近期 16076.07hm^{2}和远期 16750.89hm^2,高风险区面积由 254.07hm^{2}增加至 276.48hm^{2}和 286.2hm^2。由此可见,尽管暴雨强度的增加是城市暴雨洪涝灾害风险加剧的根本诱因,但是以建设用地面积增加为表征的土地利用变化对暴雨洪涝灾害风险的影响不容忽视。

关键词:土地利用变化情景; 暴雨洪涝灾害风险; 等体积淹没算法;深圳市茅洲河流域

Storm flood disaster risk assessment in urban area based on the simulation of land use scenarios: A case of Maozhou Watershed in Shenzhen City

PENG Jian, WEI Hai, WU Wenhuan, LIU Yanxu, WANG Yanglin*
Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, *China*

Abstract: Recently, the frequent storm flood has become the main hazard in the coastal cities, which treats to the regional sustainable development. Land use change has transformed the original landscape structure and hydrological processes, and also becomes the significant factor to the increase of urban storm flood disaster risk. It is significant to discuss on the relationship between the land use change and the storm flood hazard risk. Based on the CLUE-S model, the SCS model and the equal volume submerged algorithm, this article took the Maozhou Watershed as the study area and quantitatively evaluated the storm flood disaster risk in the twelve interactional scenarios of the storm hazard and the hazard affected land use. Results showed that the urban storm flood hazard risk increased remarkably with the increased storm magnitude on a certain pattern of land use. While at the same level of the storm hazard, the areas of medium and high risk patches showed an obvious increasing trend with the increased construction land. The area increasing rates of high or medium level risk patches and the construction land were highly-related with the form of synergy. Take the recurrence interval of 50years as an example, the area of high risk patches grew from 254.07hm^2 to 276.48hm^2 and 286.2hm^2 when the construction land area

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41330747)
收稿日期:2017-08-27; **修订日期**:2018-02-28

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: ylwang@ urban.pku.edu.cn

increased from the base scenario to short-term and long-term scenario, respectively. Therefore, even though the significant factor to the storm flood disaster risk is the storm magnitude, the influence of land use change characterized by the increasing of construction land on the storm flood disaster risk cannot be ignored.

Key Words: land use change scenarios; storm flood disaster risk; equal volume submerged algorithm; Maozhou Watershed in Shenzhen City

我国是世界上少数的几个自然灾害频发、灾情严重的国家之一[1],存在着灾害种类多、发生频率高、影响范围广、损失严重等特征[2],而水旱灾害则是当前最主要的自然灾害类型。随着城市化进程的不断加快,城市特别是沿海地区城市以建设用地快速增加为主要特征的土地利用空间格局变化显著,人口和财富在城市地区不断集聚,城市自然灾害脆弱性也逐渐增强,暴雨洪涝灾害风险显著加剧。近年来频频发生的暴雨洪涝引起了公众和媒体的广泛关注,更给城市的发展造成了严重的损失。例如,2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨造成 79 人死亡,房屋倒塌 10660 间,160.2 万人受灾,经济损失达 116.4 亿元;作为中国最年轻的城市,深圳也饱受暴雨洪涝灾害的袭击,2014 年 5 月 11 日,深圳遭遇 2008 年以来最强暴雨,造成 150 处道路积水,2000 多辆车受淹,直接经济损失约 8000 万元。

快速城市化地区土地利用变化改变了原有的景观结构和水文过程,对城市暴雨洪涝灾害的影响近年来逐渐引起了学术界的关注。随着对土地利用变化及其生态环境效应研究的不断深入,土地利用/覆被变化对水文过程的影响研究得到了长足发展[3-5],通常认为城市化过程导致城市地区不透水面积增加,引起截留、填洼、下渗和蒸发量减少,从而导致地表径流和洪峰流量增大[6-7];建设用地的增加引起地表粗糙度下降,加上排水系统的建设使得流域汇流速度加快,缩短了径流汇流时间[8];农业开发活动的增加使得农业用地不断开垦且土地利用强度增大,导致土壤入渗率减小,土壤容重增大,也增大了流域径流量和洪峰流量[9-10]。同时,土地利用变化也严重影响着洪涝灾害的致灾过程,尽管土地利用变化对暴雨洪涝灾害的影响很大程度上决定于暴雨事件及其空间尺度[11],但新世纪以来,土地利用/覆被变化被认为是洪涝灾害频发的重要原因之一[12]。从灾害系统的角度来看,城市空间的增长直接改变了地表不透水面、河流景观等洪涝灾害的孕灾环境,从而导致产流汇流过程紊乱和洪涝灾害的发生[4];而孕灾环境越不稳定,城市暴雨洪涝灾害的风险就越大[13]。因此,以建设用地增加、生态用地减少等为主要特征的土地利用结构与景观格局的变化是城市洪涝灾害日益严重的主要原因[8],而城市化带来的经济增长和不合理的土地利用方式与强度增大增加了对洪涝灾害响应的脆弱性[6],城市化程度越高的地区由于脆弱性和暴露性的增加而洪涝灾害风险越大[14]。

情景模拟是预测和防范自然灾害风险的重要研究方法,然而目前多数情景模拟研究主要针对自然灾害发生频率和强度设置情景,缺乏更具实践意义的社会经济发展情景设置及其风险的模拟[15]。城市暴雨洪涝灾害风险评价一直以来都是自然灾害领域的研究热点,以土地利用变化情景作为社会经济发展情景的空间体现,重点关注土地利用耦合强降雨过程这一暴雨洪涝灾害链的核心环节,是理解城市暴雨洪涝灾害形成机理的重要途径,对土地利用变化情景下的洪涝灾害风险定量评估具有重要意义。因此,本文基于土地利用变化模拟不同暴雨情景下的城市洪涝灾害风险,是对景观生态学视角下的城市自然灾害风险评价的积极尝试,有助于明晰土地利用变化对城市暴雨洪涝灾害风险的影响机理,并能够提供城市暴雨洪涝灾害风险防范的景观途径,从而服务于城市暴雨洪涝灾害的风险管理,提升城市防灾减灾能力,推进新型城镇化建设,促进区域可持续发展。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

深圳市地处广东省中部沿海地区、珠江口东岸,是中国典型的快速城市化地区。茅洲河是深圳市境内最

长、流域面积最大的河流,位于市域西北角,发源于深圳市境内羊台山北麓,自东南向西北汇流,全长 41.6km,共有干、支流 41 条,呈不对称树枝状分布,自沙井街道的民主村注入伶仃洋。茅洲河流域主要包括光明新区的公明街道、光明街道和宝安区的松岗街道,以及宝安区沙井街道、福永街道、石岩街道的一部分区域,地势北、东和东南高,西和西南低,可细分为 7 个二级子流域(图 1):上游为低山丘陵,包括石岩水库、鹅颈水库及长流陂水库 3 个子流域;中游以盆地与平原为主,包括罗田水库、光明农场以及燕川村为核心的子流域;下游为地形平坦的滨海冲积平原,主要是以共和村为核心的子流域。茅洲河流域是深圳市城市内涝的典型地区,流域面积 310.85km^2,总人口约为 138 万;属南亚热带海洋性季风气候区,多年平均降水量 1642—1649mm,且时空分配极不平衡,易受台风、暴雨、洪涝侵袭;流域内大部分区域位于海拔 25m 以下,土地利用类型以建设用地和林地为主,其中建设用地约占流域面积的 48%,林地约占流域面积的 32%。

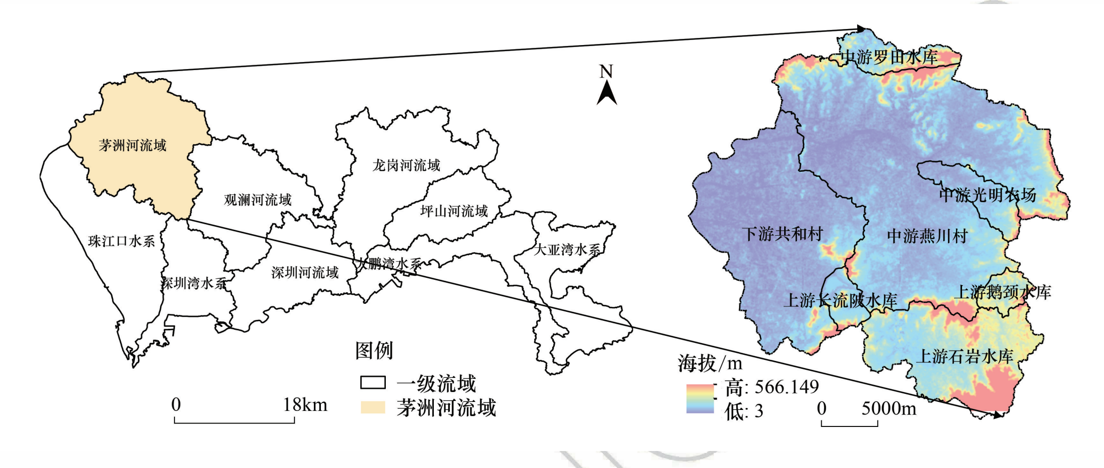


图 1　研究区地理位置示意

Fig.1　Geographical location of the study area

1.2　数据来源

本文所使用的基础数据主要包括:Landsat 系列遥感影像,轨道编号为 121/44 和 122/44,影像采集时间分别为 1995 年(1995.11.17;1995.12.30)、2000 年(1999.12.23;2000.01.02)、2005 年(2005.03.05;2005.11.23)、2010 年(2010.12.23;2010.11.30)和 2013 年(2013.10.18;2014.02.06),分辨率为 30m;珠江三角洲地区气象站点逐日降水量,来自中国气象科学数据共享服务网;全球地表覆盖产品 FROM-GLC 30m 栅格数据集,来自清华大学地球系统科学研究中心;深圳市道路交通分布、土壤类型分布图件,来自 1983 年深圳自然资源调查成果;深圳市地质灾害分布,来自深圳市地质灾害防治公共服务网;以及深圳市行政区划、DEM 数据、雨水管线分布、统计年鉴资料等。投影坐标统一采用深圳市本地坐标。

2　研究方法

本文采用国际减灾战略 UN/ISDR 对风险的定义,将风险表征为“风险(R)= 致灾因子(H)×脆弱性(V)”[16],提出基于土地利用变化情景的城市暴雨洪涝灾害风险评估框架(图 2)。其中,致灾因子(H)对应于不同年遇型降雨强度致灾危险性水平下的洪水淹没深度,由模拟降雨-产流-径流过程实现;脆弱性(V)是暴露在致灾风险源下的敏感程度,以脆弱性函数作为定量评估的依据,表征洪涝淹没区土地利用类型的期望损失。对不同暴雨致灾危险性及土地利用承灾情景下的暴雨洪涝灾害风险评估,主要采用 CLUE-S 模型模拟土地利用变化过程,基于站点历史降水数据统计分析超越概率水平,依据 SCS 模型模拟产流-径流过程,在考虑雨水管线的收集、存蓄与排水能力基础上,结合地形数据采用等体积淹没算法确定淹没范围与可能最大淹没深度,并在参考已有文献确定脆弱性函数的基础上实现风险定量模拟与制图,明晰应对城市暴雨洪涝灾害风险的景观优化途径。

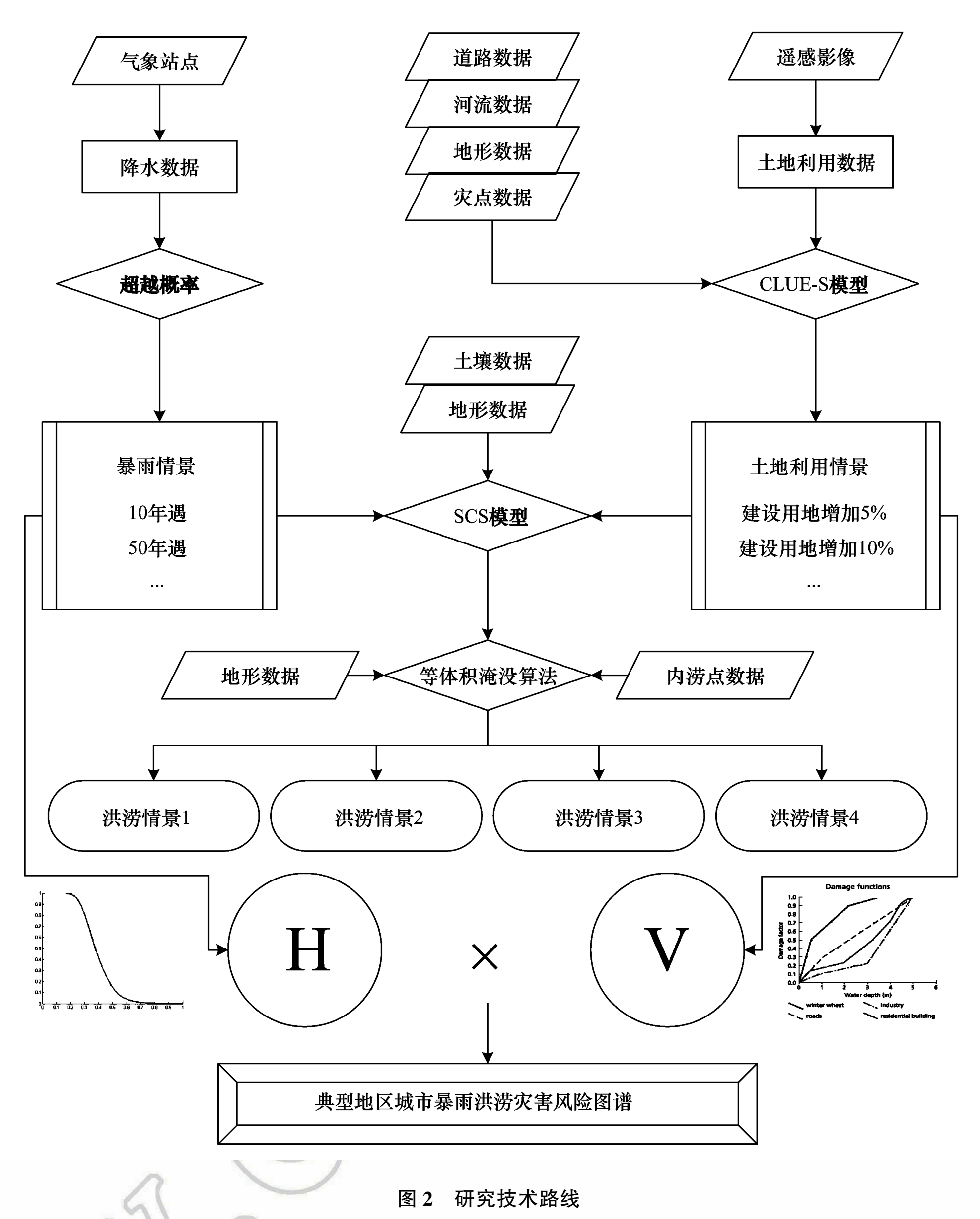


图 2 研究技术路线

Fig.2 Research framework and methodology

2.1 城市土地利用变化情景设定

考虑到土地利用变化作为自然与人文系统耦合作用的过程,受区域整体土地开发政策与空间规划管制影响显著,城市土地利用变化的情景模拟面向深圳市域,在此基础上提取茅洲河流域作为风险评估研究区。研究首先基于研究区实际及地物光谱特征,在 ENVI 软件的支持下,对获取的 Landsat 系列遥感数据进行辐射定标、大气校正和几何精校正等数据预处理后,采用监督分类的方法对研究区遥感影像解译分类为耕地、园地、林地、建设用地、水体、湿地、未利用地和草地等八种地类,并结合改进的归一化差异水体指数 MNDWI、归一化植被指数 NDVI、归一化建筑指数 NDBI 等对解译结果进行修正[17-18],从而获得 1995、2000、2005、2010 及 2013 年 5 期土地利用图作为土地利用变化模拟的基础数据,并利用获得的全球地表覆盖产品 FROM-GLC(Finer Resolution Observation and Monitoring of Global Land Cover)数据集及 Google Earth 高分辨率遥感影像[19],在深圳市 1995 年以来地类无明显改变的地区采用分层随机抽样的方法选取 200 个验证点,对解译获得的 5 期土地利用类型分类结果进行精度验证。检验结果表明,5 期土地利用类型分类结果均为总体精度 80%以上、Kappa 系数 0.75 以上,能够满足研究对分类精度的要求。在此基础上,以解译获得的 1995、2000、2005、2010 年 4 期土地利用数据为基础,以年为基本步长预测 2011 年起未来一定时段的土地利用变化,并将模拟的

2013 年结果与实际影像解译结果进行对照验证，从而提高土地利用变化情景模拟的可靠性。

基于 CLUE-S（Conversion of Land Use and its Effects at Small Region Extent）模型的土地利用变化情景模拟在区域尺度具有明显优势，其核心是预测土地利用类型需求、明晰土地利用变化驱动机制以及土地利用类型的转换次序和相对弹性系数。土地利用类型需求预测方面，尽管过去 20 年来深圳市土地利用变化特征主要表现为建设用地增加和生态用地的持续减少，但是考虑到伴随着城市化进程不断增加的建设用地通常受政策、资源等条件的约束限制，在城市化进程的中后期增长速率会逐渐降低，与地区人口的发展情况类似而呈现"S"型的增长态势。因此，选择典型"S"型变化特征的生长函数——逻辑斯蒂（Logistic）回归曲线模型[20]，在 SPSS 软件支持下对 2011 年起每年的土地利用类型进行需求预测，即以 1995—2010 年 4 期土地利用类型面积与时间间隔建立曲线估计回归模型，同时为提高模拟的精度将模拟的 2013 年土地利用类型面积与解译结果进行对照检验，从而确定未来不同时期研究区土地利用变化需求情景。土地利用变化驱动机制方面，基于多元逻辑斯蒂（Logistic）回归模型，以海拔、坡度、坡向、距公路距离、距径流线距离、距海岸线距离和距灾害点距离 7 个驱动因子表征地形、区位、灾害等对区域土地利用变化的影响，以 2010 年解译的深圳市土地利用图作为驱动力回归模型的因变量，并采用随机抽样的方法在研究区抽取 40000 个观测点，在 SPSS 软件支持下采用逐步回归的方法（引入和剔除自变量的概率水平为 0.10），分别对每种地类进行二元 Logistic 回归，并对回归结果进行 ROC（Receiver Operating Characteristic）检验，从而明晰研究区土地利用变化驱动机制。土地利用类型的转换次序和相对弹性系数方面，主要在参考其他学者基于 CLUE-S 模型的应用案例基础上结合研究区实际确定。基于此，在 CLUE-S 模型空间配置模块软件 Dyna-CLUE 软件支持下，获得 2011 年起至 2020 年共计 10 年的研究区土地利用空间格局情景。

2.2　城市暴雨致灾危险性情景设定

暴雨作为城市暴雨洪涝灾害的主要致灾因子，是引起城市内涝的根本致灾源，因而明确暴雨发生强度与频率成为城市暴雨洪涝灾害风险评估的关键环节，即需从风险诱发的角度出发，分析暴雨事件强度及发生的可能性。考虑到除突发性强降雨易引发城市暴雨洪涝灾害外，区域持续性强降雨也是不可忽视的城市暴雨洪涝致灾类型，因此，参考相关学者对区域持续性强降雨事件的定义[21-22]，选取连续三日累积降水量作为城市暴雨洪涝灾害致灾危险性情景设定的基础，以综合反映区域持续性强降雨和突发性强降雨两种类型的暴雨事件。限于数据的可得性，选取广东省境内珠江三角洲地区距离深圳市国家基本气象站 150km 范围内，海拔相近的 10 个气象站点（广州、东莞、增城、惠阳、台山、中山、珠海、深圳、汕尾、上川岛）建站以来的连续三日累积降水量，作为估计暴雨致灾危险性概率密度曲线和超越概率曲线的总体分布样本，以提高空间插值的精度；并在 MATLAB 软件支持下采用非参数的核密度估计法，分别绘制各气象站点的概率密度曲线和超越概率曲线，确定十年遇、二十年遇、五十年遇和百年遇 4 种重现期为研究区的暴雨致灾危险性情景。基于获得的各站点致灾危险性，采用适于深圳降水量较大这一特征的普通克里金插值方法[23]，模拟研究区 4 种致灾危险性水平下的连续三日累积降水量空间分布情景，并以此作为本文暴雨洪涝灾害风险评估的 4 种致灾危险性情景。

2.3　城市暴雨洪涝情景模拟

暴雨洪涝灾害是城市地域常见的洪涝灾害类型，两者通常以灾害链的形式作用于城市生态系统，并对城市生产生活和生态环境产生严重影响。暴雨洪涝情景分析是城市暴雨洪涝灾害风险评估的基础，对于明晰城市暴雨洪涝灾害风险过程、降低区域灾害风险、保障城市可持续发展均具有重要意义。开展城市暴雨洪涝情景分析，需在明确暴雨事件发生频率与强度的基础上，充分模拟城市的降雨径流过程，以进一步模拟洪涝淹没的范围及深度。其中，城市降雨径流过程的模拟是情景分析的核心环节，本文主要使用 SCS（Soil Conservation Service）模型实现。SCS 模型是美国农业部水土保持局于 20 世纪 50 年代提出的用于估算无观测站小流域地表径流的水文模型，其理论基础为 Mockus（1949）提出的 P-Q 经验关系和 Andrews（1954）提出的图表查算法[24]，模型机理明确、结构简单且对数据需求低，成为国内外许多水文模型所集成的产流计算核心模块。例如，常用的美国农业部（USDA）开发的水文评价模型 SWAT（Soil and Water Assessment Tool）和美国环境保护

署(EPA)提出的暴雨洪水管理模型 SWMM(Storm Water Management Model)等均在产流计算模块采用了 SCS 模型,从而使得 SCS 模型成为现行通用的降雨入渗产流计算工具。地表径流量与降水量的定量关系可用下式表示:

$$Q = \begin{cases} \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} & P \geq 0.2S \\ 0 & P < 0.2S \end{cases} \tag{1}$$

式中,Q 为地表径流量(mm),P 为流域总降水量(mm),S 为当时可能的最大滞留量。这里引入无量纲参数 CN 值(曲线数,Curve Number),其与 S 的关系表示为:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \tag{2}$$

参数 CN 综合反映了截留、入渗等地表过程,其数值取决于流域的地表土壤水文类型、土地利用类型、坡度以及前期土壤湿度等[25]。本文以 1983 年深圳市自然资源调查的土壤类型图为基础,经空间数字化获得深圳市土壤类型空间分布,参考美国土壤保持局对土壤水文组性质的定义,获得深圳市茅洲河流域土壤水文类型空间分布;然后,基于土地利用变化情景分析中确定的 8 种土地利用类型,以 Mishra 和 Singh[26] 提供的 CN 值查找表为基础,参考相关学者在珠江三角洲、深圳市等地区基于 SCS 模型的应用案例中对 CN 值的修正[7,27-29],确定研究区中等前期土壤湿润程度(AMC Ⅱ)下的 CN_2 值查找表(表 1)。

表 1 研究区中等前期土壤湿润程度下 CN_2 值

Table 1 The CN_2 value of AMC Ⅱ in Maozhou Watershed

土地利用类型 Land use types	土壤水文类型 A Hydrologic soil group A	土壤水文类型 B Hydrologic soil group B	土壤水文类型 C Hydrologic soil group C	土壤水文类型 D Hydrologic soil group D
耕地 Farmland	67	78	85	89
园地 Orchard	43	65	76	82
林地 Forest land	25	55	70	77
建设用地 Construction land	85	90	94	96
水体 Water	98	98	98	98
滩涂 Wetland	32	58	72	79
未利用地 Unused land	77	86	91	94
草地 Grassland	39	61	74	80

同时,引入坡度因子对 CN 值进行修正[30]:

$$CN_{2s} = \frac{(CN_3 - CN_2)}{3} \cdot [1 - 2 \cdot \exp(-13.86 \cdot \text{slope})] + CN_2 \tag{3}$$

$$CN_3 = CN_2 \cdot \exp[0.00673 \cdot (100 - CN_2)] \tag{4}$$

式中,CN_{2s} 为修正后的中等前期土壤湿润程度下的曲线值,CN_3 为湿润前期土壤湿润程度下的曲线值,*slope* 为坡度值。基于此获得研究区基期、近期、远期三种情景平均前期土壤湿润程度下的 CN 值空间分布,从而确定不同暴雨致灾危险性情景下的径流分布格局。

流域径流的运移汇流过程是一个复杂的时空过程,难以用数学或物理方程严格地描述洪水的演进,现有的水文学模型大多通过求解圣维南方程来计算非恒定水流汇流,进而模拟流动水体的深度分布[31];基于 GIS 的洪水淹没模型则多基于 DEM 数据,采用种子蔓延的搜索算法判断 DEM 区域内每一点四邻域或八邻域的流动方向,在考虑连通性的条件下求解洪水淹没的连续平面,从而模拟自然地表水流沿坡度最陡方向由高处向低处流动的规律并获得淹没区范围[32-33]。这些求解方法过程大多相对复杂,且难以反映可能的最大淹没水深。等体积淹没算法的基本思想则是基于径流汇水过程中地表水流从海拔高处向低处汇集的重力特性和地形起伏情况,以径流总量与洪涝淹没范围内水量体积相等的原理来模拟洪水的淹没范围[34],属无源淹没分析

的常见算法,相对而言方法实用、便捷且能较快实现淹没区现状数据的空间分析,是反演洪涝灾害最大淹没水深的重要途径,尤其适用于小尺度区域的洪涝情景模拟。本文在 Python 语言的支持下,基于 ArcGIS 的 3D 分析工具函数,在考虑雨水管线的收集、存蓄与排水能力基础上,采用迭代算法将淹没区洪水总体积逼近流域地表径流总量以获得淹没区域水平面的高程值,从而实现城市暴雨洪涝情景模拟。

2.4　城市暴雨洪涝灾害脆弱性分析

暴雨洪涝灾害脆弱性是承灾体对暴雨洪涝灾害敏感性、恢复力与暴露性的综合表征,是城市暴雨洪涝灾害风险评估的基础。基于土地利用变化情景分析确定的 8 种土地利用类型构建土地利用承灾体脆弱性函数,需确定各土地利用类型对暴雨洪涝灾害致灾因子强度的损失变化关系,本文选取较为常用的淹没水深度量洪涝灾害风险的致灾胁迫强度。对于不同的土地利用类型,由于其内部组成及耐水特性存在差异,相同淹没水深胁迫下的损失率会存在明显差异;随着淹没水深增大,不同土地利用类型的损失率变化也会有所不同。一般来说,对于特定的承灾体,致灾因子强度越大,承灾体的损失率越高,即致灾因子的发生概率越小,承灾体的损失越大[35]。许多学者对洪涝灾害土地利用类型脆弱性函数的研究证实了类似的变化关系。例如,Elsner 等给出了不同淹没水深下畜牧业、农业、工业、交通通信业、仓储、建筑和汽车等不同用地类型的损失变化关系[36],Jonkman 等分析了洪涝淹没水深与建筑物及屋内设施的损失关系[37],Sande 等给出了冬小麦、工业、道路与居住建筑 4 种用地类型在不同淹没水深下的损失率变化关系[38]。这些研究数据虽来自不同国家且土地利用分类体系存在较大差异,但不同土地利用类型对淹没水深的响应变化存在一定的共性规律,能够为暴雨洪涝灾害土地利用类型脆弱性函数的构建提供参考。

Coto 在对哥斯达黎加地区 33 种土地利用类型的耐水特性评估的基础上,给出了各土地利用类型在四种不同淹没水深下的脆弱性值[39],是目前基于土地利用分类的脆弱性赋值较为详细的研究案例。本文基于暴雨洪涝灾害土地利用承灾体脆弱性对淹没水深的响应变化特征,重点参考该研究中不同土地利用类型洪涝灾害脆弱性函数,并借鉴其他相关研究成果[40-41],构建城市暴雨洪涝灾害不同淹没水深下土地利用类型的脆弱性函数值(表 2)。其中,水体、滩涂、未利用地和林地脆弱性相对较小,耕地、园地、草地和建设用地的脆弱性较高;且随着淹没深度的增加,建设用地的脆弱性明显增大,反映出建设用地对暴雨洪涝灾害较高的脆弱性。同时,由于等体积淹没算法模拟的是最大可能淹没深度,一定意义上表征像元尺度的累积洪峰流量深度,因而脆弱性函数中的淹没水深胁迫也可视为通过像元的累积淹没水深,而非真实淹没中的静态淹没深度。

表 2　不同土地利用类型暴雨洪涝灾害脆弱性函数

Table 2　Vulnerability of different land use to the storm flood disaster

土地利用类型 Land use types	淹没水深 The flood depth/m				
	<0.1	0.1—0.5	0.5—1.5	1.5—3.0	>3.0
耕地 Farmland	0.01	0.2	0.5	0.7	0.8
园地 Orchard	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
林地 Forest land	0	0	0.1	0.2	0.3
建设用地 Construction land	0.05	0.3	0.6	0.8	0.9
水体 Water	0	0	0	0.05	0.1
滩涂 Wetland	0	0.01	0.1	0.15	0.2
未利用地 Unused land	0	0.01	0.1	0.1	0.15
草地 Grassland	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7

3　结果与分析

3.1　土地利用变化情景

以解译的 1995、2000、2005、2010 年 4 期土地利用图为基础数据,在 CLUE-S 模型空间配置模块软件 Dyna-CLUE 支持下,获得 2011 年起未来 10 年的土地利用空间分布情景(图 3)。同时,为检验模型模拟结果的可靠

性,将 2013 年模拟结果与解译结果进行空间对照,并在深圳市范围内随机抽取 10000 个验证点进行模拟精度检验。结果显示 2013 年模拟的土地利用类型空间分布总体精度为 78.6%,Kappa 系数为 0.679,说明 CLUE-S 模型能够较好地模拟深圳市土地利用变化情景,基本能够满足研究对土地利用情景精度的要求。

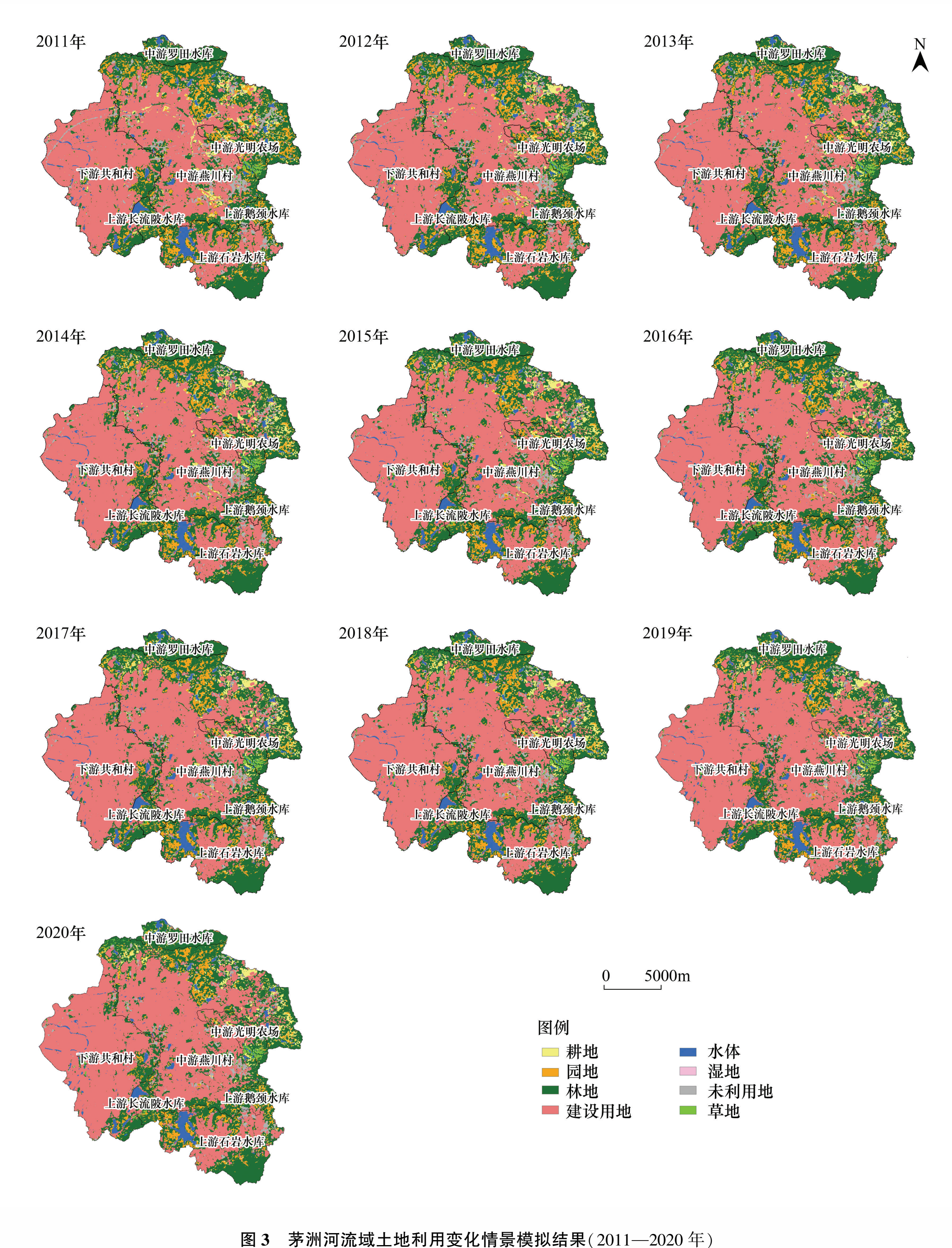


图 3 茅洲河流域土地利用变化情景模拟结果(2011—2020 年)

Fig.3 Modeling results of land use change in Maozhou Watershed (2011—2020)

对研究区 1995 年以来土地利用变化进行分析可以发现,近 20 年来研究区土地利用类型的数量和结构均发生了巨大的变化,建设用地面积持续增加,城镇化率不断提高,大量的非建设用地转为建设用地。而 2011 年起未来十年间,受自然条件及土地利用空间管制政策约束,各土地利用类型变化速率降低;土地利用

空间分布格局未发生明显变化,建设用地面积缓慢增加,且多为现有建设用地周边的空间拓展;耕地和林地减少缓慢,水体和湿地面积几乎没有变化,园地和未利用地减少较快,其中未利用地减少主要为推平未建的裸土变为建设用地;随着城市公共绿色空间、绿色廊道等建设,草地面积呈微量增加的趋势。同时,与 2013 年的建设用地面积相比,2016 年建设用地面积约增加 5%,2020 年建设用地面积增加近 10%,这两期土地利用情景可作为暴雨洪涝灾害风险评估的近期、远期情景。

3.2　暴雨致灾危险性情景

基于各气象站点的概率密度曲线和超越概率曲线,确定十年遇、二十年遇、五十年遇和百年遇四种重现期情景下的暴雨致灾危险性,采用普通克里金插值方法获得研究区 4 种致灾危险性水平下的连续三日累积降水量空间分布(图 4)。结果显示,连续三日累积降水量的空间分布在十年遇危险性水平下总体较为均一,全区平均为 48.56mm,标准差仅为 0.12,呈现西部地区略高于东部地区的趋势,反映出茅洲河流域作为降雨较为充沛的沿海地区,十年遇连续三日累计降水事件在空间上差异不大;二十年遇呈现由南向北递减的趋势,全区平均为 77.72mm,标准差为 0.52;五十年遇呈现东南向西北地区递减的趋势,全区平均为 121.54mm;百年遇分布格局与五十年遇基本类似,全区平均为 159.33mm。同时,随着年遇型水平的增加,连续三日累计降水量呈现较为明显的区域差异,从高值区的空间动态来看,十年遇水平下高值区集中于流域西部,但与中东部地区差异不是很明显;二十年、五十年和百年遇水平下,高值区主要集中于南部上游石岩水库子流域地区,这与该地区海拔相对较高的微地形及大区域海陆关系密切相关。

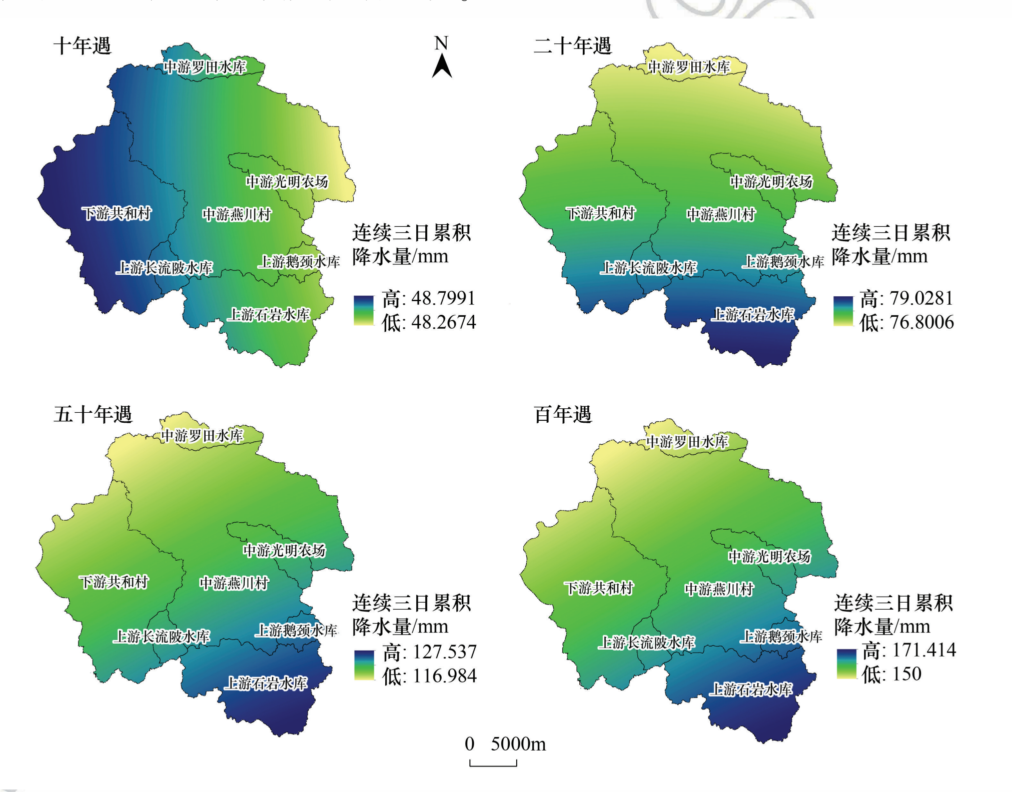


图 4　茅洲河流域不同重现期连续三日累积降水量空间分布(十年、二十年、五十年、百年遇)

Fig.4　Spatial distribution of three-day accumulated precipitation under different recurrence intervals (10a, 20a, 50a and 100a)

3.3　暴雨洪涝情景

基于对研究区连续三日累积降水量超越概率的分析,选取重现期为十年、二十年、五十年和百年遇水平作为暴雨致灾危险性情景,分别对应概率水平为 0.1、0.05、0.02 和 0.01。同时,基于对深圳市过去 20 年土地利用变化的趋势分析,模拟了 2011—2020 年土地利用变化的空间格局,选取作为土地利用变化模拟精度验证的 2013 年为基期土地利用情景,考量未来建设用地增长的时空过程,确定与基期相比建设用地面积增加 5% 为

近期,增加 10%为远期,发现基本对应于 2016 年和 2020 年的建设用地面积总量,基于此确定 CLUE-S 模型模拟的 2013 年土地利用空间分布为基期土地利用情景,2016 年为近期土地利用情景,2020 年为远期土地利用情景。4 种暴雨致灾危险性情景与 3 期土地利用情景的交叉组合构成暴雨洪涝致灾、承灾的 12 种模拟情景(表 3)。

表 3 茅洲河流域暴雨洪涝情景设定

Table 3 Scenarios of the storm flood in Maozhou Watershed

土地利用情景 Land use scenarios	暴雨致灾危险性情景 Storm hazard scenarios			
	十年遇 Once-every-ten-year	二十年遇 Once-every-twenty-year	五十年遇 Once-every-fifty-year	百年遇 Once-every-hundred-year
基期(2013 年) Base scenario (2013)	B_Y10	B_Y20	B_Y50	B_Y100
近期(2016 年) Short-term scenario (2016)	S_Y10	S_Y20	S_Y50	S_Y100
远期(2020 年) Long-term scenario (2020)	L_Y10	L_Y20	L_Y50	L_Y100

以字母“B”、“S”、“L”分别表征土地利用情景的基期(Base Scenario)、近期(Short-term Scenario)和远期(Long-term Scenario),以字母“Y”加数字表征不同年遇型(Year)的暴雨致灾危险性情景,两者以下划线“_”相连共同表征 12 种暴雨洪涝情景,并作为本文风险情景分析的指代基础

基于构建的 12 种暴雨洪涝致灾、承灾交互情景以及对应情景下 *CN* 值的空间分布,采用 SCS 模型经典算法,在 ArcGIS 软件支持下分别计算像元尺度的径流深空间分布(图 5)。结果显示,各情景下茅洲河流域径流深的空间分布与降水量的空间分布相比,受下垫面条件影响更大,区域内径流深的相对高值区主要为建设用地、水体等用地类型区;随着暴雨致灾危险性的重现期由十年遇增加至百年遇,区域径流深呈现明显的增加趋势;对于同等强度的致灾影响,随着建设用地等城市不透水面增加,流域总径流量也增加明显。

基于 12 种情景下茅洲河流域径流深的空间分布,综合考虑城市雨水管线等排水设施的存蓄、收集与泄洪能力影响,在 DEM 数据辅助支撑下采用等体积淹没算法,分析各情景下茅洲河流域的最大可能淹没范围和深度。结果显示,各情景下暴雨洪涝的淹没范围主要位于茅洲河中游燕川村子流域和下游共和村子流域的平原地区,以及上游石岩水库子流域地势较低的低丘盆地,总体上与茅洲河流域内雨水管线的空间分布格局基本一致;最大淹没深度的高值区出现于茅洲河中上游二级子流域的出水口附近,其空间分布与等体积淹没算法在坡降比较大流域应用的局限性相关,但同时也在一定程度上反映了各二级子流域出口处的洪峰流量分布,对于加强地下管网排水能力建设具有重要的空间指示意义。

为检验各情景下城市暴雨洪涝淹没范围的模拟精度,系统梳理深圳新闻网、深圳都市网等相关媒体对城市易涝点的报道,基于其对易涝点位置的描述,在电子地图辅助下还原内涝点空间位置。媒体报道显示,深圳市全市共有大小内涝点约 268 个,主要集中于宝安区、龙岗区、光明新区和坪山新区的部分街道,内涝面积约 80 km^2[42];从流域分布来看,茅洲河流域内易涝点共计 18 个,主要位于下游共和村子流域、中游燕川村子流域的平原地区,以及上游石岩水库子流域的盆地区域,与雨水管线的空间分布格局高度一致,这些地区也是建设用地的集中连片区,足见茅洲河流域内雨水管线的排水能力尚显不足。由于对易涝点的媒体报道仅说明为内涝的易发区,未给出具体的暴雨事件和强度,因而难以确定各易涝点城市内涝发生时的降水量和流域径流分布,考虑到暴雨洪涝灾害发生时日降水量通常在 50mm 以上,故以茅洲河流域暴雨洪涝灾害风险模拟的 B_Y20 情景作为精度分析的模拟情景表征,即将易涝点用以验证基期土地利用情景下发生二十年遇暴雨事件的淹没范围精度。此外,由于媒体报道的内涝点多位于立交桥等城市微地形地区,在 30m 分辨率 DEM 数据上难以有效反映,且新闻报道的内涝点位置多以描述为主,较多易涝点难以确定发生内涝的准确空间分布与范围;考虑到通常城市内涝的发生成片区状分布,如果易涝点周边 600m(20 个像元)范围内存在情景模拟中的淹没像元,则认为模拟的城市内涝淹没区域与媒体报道的真实易涝点分布基本一致,定义验证情况为“1”,否则情景模拟的淹没范围未准确反映真实的内涝分布,定义验证情况为“0”。

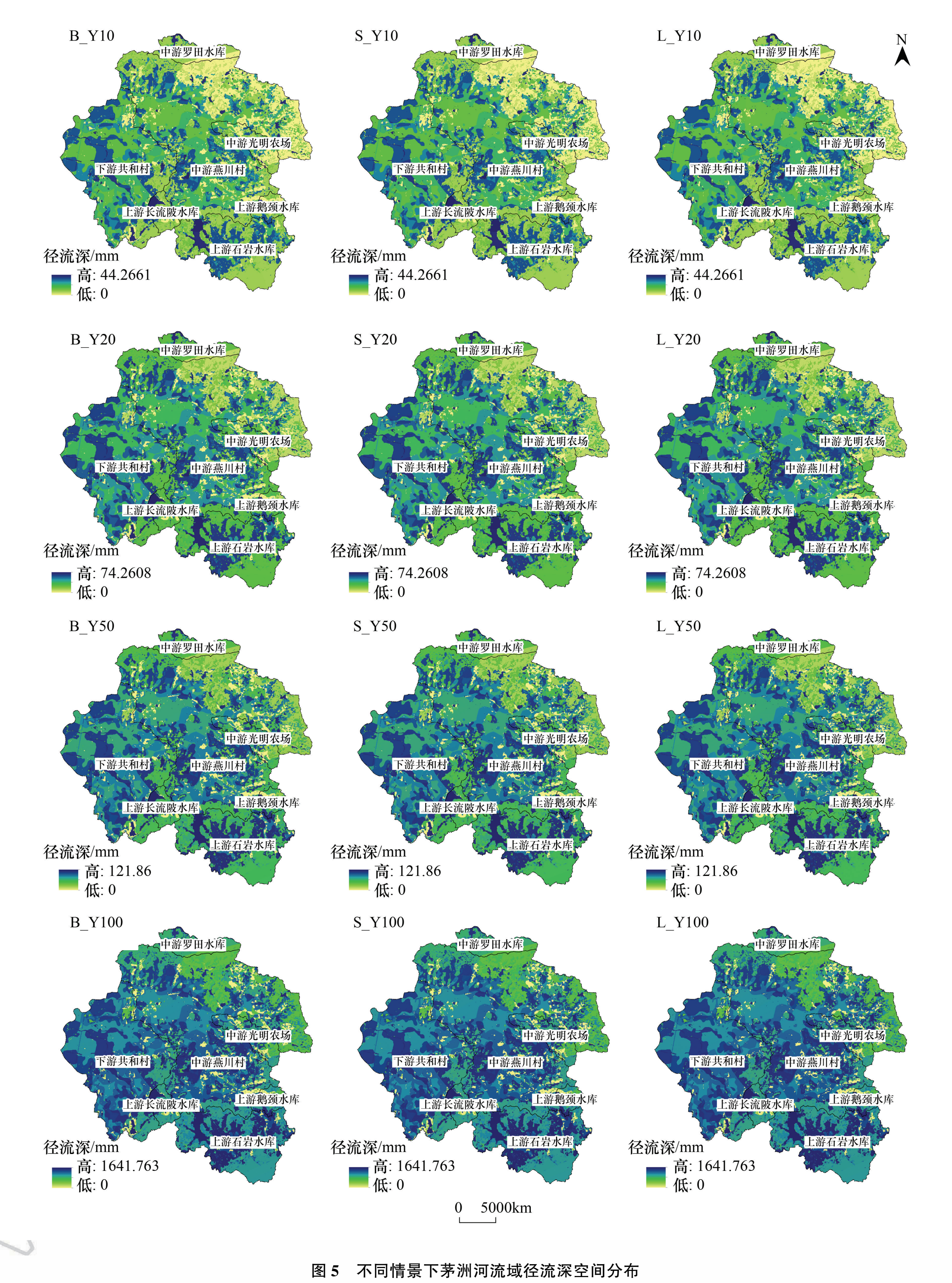


图 5　不同情景下茅洲河流域径流深空间分布

Fig.5　Spatial distribution of runoff depth in different scenarios in Maozhou Watershed

B_Y20 情景下易涝点验证情况如图 6 所示。结果显示,媒体报道的茅洲河流域内易涝点与情景模拟的淹没范围空间分布格局基本一致。18 个易涝点中验证情况为“1”的易涝点有 11 个,验证精度 61.1%,一定程度上说明本文基于 SCS 模型模拟流域的径流深空间分布并采用等体积淹没算法模拟暴雨洪涝淹没的过程分析

具有一定的可行性。

3.4 暴雨洪涝灾害风险

基于确定的评估框架对 12 种致灾、承灾的交互情景下茅洲河流域暴雨洪涝灾害风险进行评估,并采用等间隔的分级方法将风险值分为低风险($0<R<0.33$)、中等风险($0.33\leqslant R<0.66$)以及高风险($0.66\leqslant R<1$)3 个风险等级水平(图 7),以表征暴雨洪涝灾害的相对风险等级。结果显示,对于特定的土地利用情景,随着暴雨致灾强度的增加,暴雨洪涝灾害的风险范围呈明显的扩大趋势;十年遇情景下高风险区主要位于茅洲河流域中游的平原地区,随着暴雨致灾强度的增加,高风险区大面积拓展至中下游平原区域,在石岩水库子流域也出现高风险区,表明暴雨致灾危险性的增加是暴雨洪涝灾害风险加剧的根本原因。而在特定的暴雨致灾危险性情景下,随着建设用地面积的增加,洪涝灾害高风险区也呈现较为明显的增加趋势,主要体现为淹没水深增大及土地利用类型转变为脆弱性较高的地类,区域整体风险水平上升。因此,区域土地利用变化引起流域产流、汇流过程及承灾体脆弱性的非线性综合变化,共同作用导致暴雨洪涝灾害风险加剧。

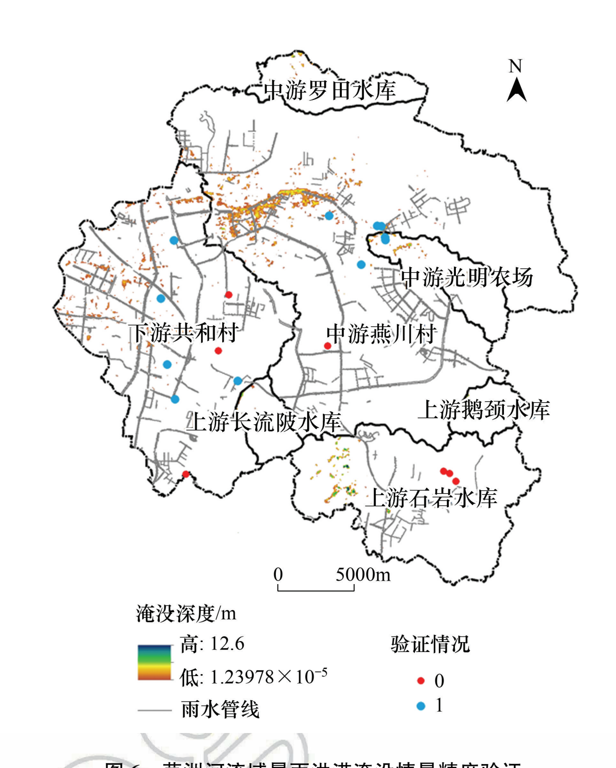


图 6 茅洲河流域暴雨洪涝淹没情景精度验证

Fig.6 Accuracy validation for the flood scenarios in Maozhou Watershed

为便于分析土地利用变化对区域暴雨洪涝灾害风险的影响,本文对茅洲河流域 12 种暴雨洪涝灾害情景下各等级风险的面积进行统计(图 8)。结果显示,对于每一种暴雨致灾情景,随着建设用地面积增加,中等风险和高风险区面积均呈现较为明显的增加趋势,低风险区面积呈现一定下降的趋势,即部分低风险区、中等风险区风险水平升高为中等、高风险。尽管 4 种暴雨致灾危险性重现期情景下,中等风险和高风险区面积的增加率与建设用地面积的增加率不完全相等,但是两者表现出明显的非线性协同变化特征。以五十年遇危险性水平为例,随着建设用地面积由基期的 15368.85hm^{2}增加至近期 16076.07hm^{2}和远期 16750.89hm^2,高风险区面积由 254.07hm^{2}增加至 276.48hm^{2}和 286.2hm^2,表明区域建设用地面积增加会引起流域径流、淹没范围及深度增大,以及暴雨洪涝灾害土地利用承灾体脆弱性升高,因而以建设用地增加为主要特征的城市土地利用变化对区域暴雨洪涝灾害风险的影响不容忽视。

4 结语

本文以深圳城市内涝的典型地区——茅洲河流域为例,基于构建的土地利用变化情景和暴雨致灾危险性情景,采用“风险(R)= 致灾因子(H)×脆弱性(V)”的评估框架,综合运用 CLUE-S 模型、SCS 模型及等体积淹没算法等对 12 种暴雨洪涝致灾-土地利用承灾情景下的城市暴雨-入渗-产流-汇流-洪涝等过程进行模拟,并对相应的灾害风险进行定量评估,是对景观生态学视角下的城市自然灾害发生演变及其风险评估的积极尝试,有助于明晰土地利用变化对城市暴雨洪涝等自然灾害生态风险的影响机理和耦合关系。研究结果表明,随着暴雨致灾危险性的增加,暴雨洪涝灾害高风险区面积呈现明显的增加趋势;而对于相同的暴雨致灾危险性情景,随着建设用地面积的增加,暴雨洪涝灾害中等风险和高风险区范围也呈现较为明显的增加趋势,两者呈现非线性协同变化关系。以五十年遇危险性水平为例,建设用地面积由基期的 15368.85hm^{2}增加至近期 16076.07hm^{2}和远期 16750.89hm^2,高风险区面积由 254.07hm^{2}增加至 276.48hm^{2}和 286.2hm^2。这表明尽管暴雨是区域暴雨洪涝灾害的主要致灾因子,以建设用地面积增加、生态用地面积减少为主要特征的城市土地利

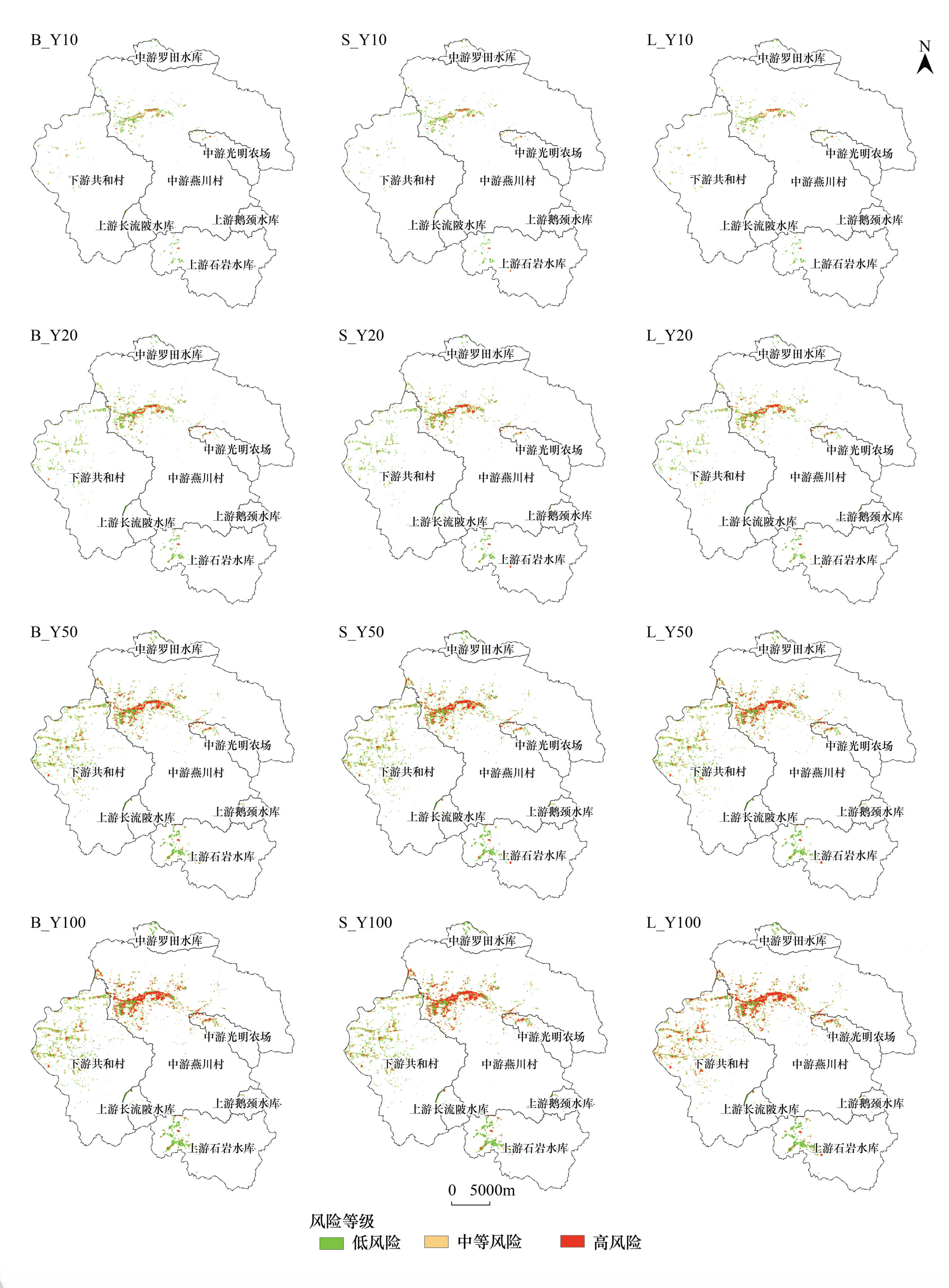


图 7　不同情景下茅洲河流域暴雨洪涝灾害风险

Fig.7　Storm flood disaster risk in different scenarios in Maozhou Watershed

用变化,将引起地表径流量及淹没区面积和淹没水深增大;土地利用变化引起的暴雨洪涝灾害响应不容忽视。因此,在加强易涝区地下管网存蓄泄洪能力建设的同时,严格控制建设用地规模、优化土地利用空间格局,是增强城市暴雨洪涝灾害风险防范能力的重要景观途径。

然而,限于数据可得性等因素制约,论文在诸多方面仍存在不足,主要包括:(1)未能将城市地域排水能

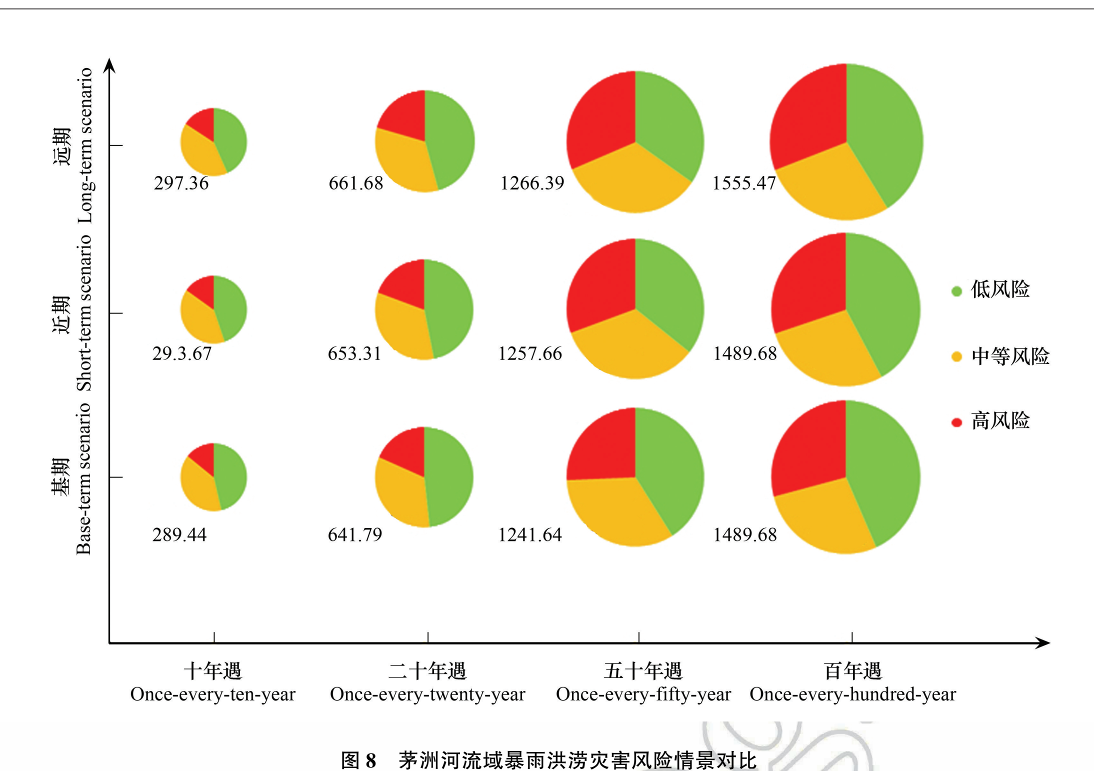


图 8 茅洲河流域暴雨洪涝灾害风险情景对比

Fig.8 Comparisons of the storm flood disaster risk in different scenarios in Maozhou Watershed

图中圆形大小及注记表示风险区面积

力的空间差异及其时间动态影响纳入流域汇流及洪涝灾害的模拟。暴雨洪涝灾害的形成与区域雨水管线等排水设施的能力密切相关,本文在洪涝灾害淹没范围模拟时,仅在参考雨水管线的管径、材质等属性信息基础上确定区域雨水管线的综合存蓄与泄洪能力,未能进行排水能力的动态过程模拟,使得模型模拟存在一定的误差;(2)未能细分城市建成区内不同类型建设用地的影响。城市建成区范围内建设用地可细分为住宅、商服、教育、交通等多种用地类型,不同类型建设用地的耐水性和脆弱性存在较大差异。但不同建设用地类型难以基于 Landsat 系列遥感数据反演获取并进行变化情景的模拟,在社区等小尺度区域开展研究时可考虑对建设用地进行细分。此外,本文在模拟数据精度、模拟模型优化及情景仿真分析等方面也有一定不足。

参考文献(References):

[1] 王静爱, 史培军, 王平, 王瑛. 中国自然灾害时空格局. 北京: 科学出版社, 2006.

[2] 刘毅, 吴绍洪, 徐中春, 戴尔阜. 自然灾害风险评估与分级方法论探研——以山西省地震灾害风险为例. 地理研究, 2011, 30(2): 195-208.

[3] 史晓亮, 李颖, 严登华, 赵凯. 流域土地利用/覆被变化对水文过程的影响研究进展. 水土保持研究, 2013, 20(4): 301-308.

[4] 苏伟忠, 杨桂山, 陈爽. 城市空间扩展对区域洪涝孕灾环境的影响. 资源科学, 2012, 34(5): 933-939.

[5] 王艳君, 吕宏军, 施雅风, 姜彤. 城市化流域的土地利用变化对水文过程的影响——以秦淮河流域为例. 自然资源学报, 2009, 24(1): 30-36.

[6] 葛怡, 史培军, 周俊华, 邹铭. 土地利用变化驱动下的上海市区水灾灾情模拟. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 25-30.

[7] 郑璟, 方伟华, 史培军, 卓莉. 快速城市化地区土地利用变化对流域水文过程影响的模拟研究——以深圳市布吉河流域为例. 自然资源学报, 2009, 24(9): 1560-1572.

[8] 袁艺, 史培军, 刘颖慧, 邹铭. 土地利用变化对城市洪涝灾害的影响. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 6-13.

[9] Costa M H, Botta A, Cardille J A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. Journal of Hydrology, 2003, 283(1/4): 206-217.

[10] Githui F, Mutua F, Bauwens W. Estimating the impacts of land-cover change on runoff using the soil and water assessment tool (SWAT): case study of Nzoia catchment, Kenya. Hydrological Sciences Journal, 2009, 54(5): 899-908.

[11] Niehoff D, Fritsch U, Bronstert A. Land-use impacts on storm-runoff generation: scenarios of land-use change and simulation of hydrological response in a meso-scale catchment in SW-Germany. Journal of Hydrology, 2002, 267(1/2): 80-93.

[12] Camorani G, Castellarin A, Brath A. Effects of land-use changes on the hydrologic response of reclamation systems. Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C, 2005, 30(8/10): 561-574.
[13] 尚志海, 丘世钧. 当代全球变化下城市洪涝灾害的动力机制. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 100-105.
[14] Liu J F, Zhang X N, Wang H M. Flood risk mapping for different landuse senarios based on RS and GIS. Applied Mechanics and Materials, 2013, 295-298: 2415-2419.
[15] 彭建, 刘焱序, 潘雅婧, 赵志强, 宋治清, 王仰麟. 基于景观格局—过程的城市自然灾害生态风险研究: 回顾与展望. 地球科学进展, 2014, 29(10): 1186-1196.
[16] UNISDR(United Nations International Strategy for Disaster Reduction). Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives. United Nations Publications, Geneva, Switzerland, 2004.
[17] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
[18] 查勇, 倪绍祥, 杨山. 一种利用TM图像自动提取城镇用地信息的有效方法. 遥感学报, 2003, 7(1): 37-40.
[19] Gong P, Wang J, Yu L, Wang J, Yu L, Zhao Y C, Zhao Y Y, Liang L, Niu Z G, Huang XM, Fu H H, Liu S, Li C C, Li X Y, Fu W, Liu C X, Xu Y, Wang X Y, Cheng Q, Hu L Y, Yao W B, Zhang H, Zhu P, Zhao Z Y, Zhang H Y, Zheng Y M, Ji L Y, Zhang Y W, Chen H, Yan A, Guo J H, Yu L, Wang L, Liu X J, Shi T T, Zhu M H, Chen Y L, Yang G W, Tang P, Xu B, Giri C, Clinton N, Zhu Z L, Chen J, Chen J. Finer resolution observation and monitoring of global land cover: first mapping results with Landsat TM and ETM+ data. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(7): 2607-2654.
[20] 陈彦光. 地理数学方法: 基础和应用. 北京: 科学出版社, 2011.
[21] 陈官军. 中国南方夏季区域持续性强降水与大气季节内振荡[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2014.
[22] 李林涛, 徐宗学, 庞博, 刘浏. 中国洪灾风险区划研究. 水利学报, 2012, 43(1): 22-30.
[23] 邬伦, 吴小娟, 肖晨超, 田原. 五种常用降水量插值方法误差时空分布特征研究——以深圳市为例. 地理与地理信息科学, 2010, 26(3): 19-24.
[24] 李军, 刘昌明, 王中根, 梁康. 现行普适降水入渗产流模型的比较研究: SCS与LCM. 地理学报, 2014, 69(7): 926-932.
[25] 赵少华, 邱国玉, 杨永辉, 吴晓, 尹靖. 遥感水文耦合模型的研究进展. 生态环境学报, 2006, 15(6): 1391-1396.
[26] Mishra S K, Singh V P. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2003.
[27] 杜士强. 土地利用变化对水文过程影响的模拟及其对洪水管理的启示[D]. 北京: 北京师范大学, 2013.
[28] 史培军, 袁艺, 陈晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响. 生态学报, 2001, 21(7): 1041-1049.
[29] Shi P J, Yuan Y, Zheng J, Wang J A, Ge Y, Qiu G Y. The effect of land use/cover change on surface runoff in Shenzhen region, China. Catena, 2007, 69(1): 31-35.
[30] 刘珍环, 曾祥坤. 深圳市不透水表面扩展对径流量的影响. 水资源保护, 2013, 29(3): 44-50.
[31] 易永红, 陈秀万, 吴欢. 基于遥感信息的淹没水深算法研究. 地理与地理信息科学, 2005, 21(3): 26-29.
[32] 郭利华, 龙毅. 基于DEM的洪水淹没分析. 测绘通报, 2002, (11): 25-27.
[33] 刘仁义, 刘南. 基于GIS的复杂地形洪水淹没区计算方法. 地理学报, 2001, 56(1): 1-6.
[34] 刘小生, 黄玉生. "体积法"洪水淹没范围模拟计算. 测绘通报, 2004, (12): 47-49.
[35] 史培军. 中国自然灾害风险地图集. 北京: 科学出版社, 2011.
[36] Elsner A, Mai S, Meyer V, Zimmermann C. Integration of the flood risk in coastal hinterland management//Proceedings of the International Conference CoastGis. Genua, Italy, 2003.
[37] Jonkman S N, Bočkarjova M, Kok M, Bernardini P. Integrated hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the Netherlands. Ecological Economics, 2008, 66(1): 77-90.
[38] Sande C J V D, Jong S M D, Roo A P J D. A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2003, 4(3): 217-229.
[39] Badilla Coto E. Flood Hazard, Vulnerability and Risk Assessment in the City of Turrialba, Costa Rica. The Netherlands: International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, 2002.
[40] 石勇. 灾害情景下城市脆弱性评估研究——以上海市为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
[41] 张华, 尹占娥, 殷杰, 安佑志, 张书娟. 基于土地利用的城市暴雨内涝灾害脆弱性评估——以上海浦东新区为例. 上海师范大学学报: 自然科学版, 2011, 40(4): 427-434.
[42] 深圳新闻网. 全深圳市268个内涝点, 你家附近有没"水浸街". (2012-07-24) [2015-05-03]. http://www.sznews.com/news/content/2012-07/24/content_6973904.htm.